

# Imperfect Signal Cancellation과 Feedback을 이용한 Feedforward 선형전력증폭기에 관한 연구

° 박 정 민, 양 승 인

승실대학교 정보통신전자공학부

E-mail : ° windpjm@hotmail.com, siyang@ieee.org

## A Study On the Feedforward Linear Power Amplifier Using Imperfect Signal Cancellation And Feedback

Jung-Min Park , Seung-In Yang

School of Electronics Eng., Soongsil Univ.

### Abstract

In this paper, A feedforward linear power amplifier is analyzed for imperfect signal cancellation and negative feedback for basestaion of IMT2000 band.

the distortion generatiyed by the error amplifier is reduced using an imperfect signal cancellation for a 1-carrier WCDMA source by 4.3dB at 2.5MHz offset and 6dB at 5MHz offset of IMSR(intermodulation signal power ratio) compared to a perfect signal cancellation system.

additionally, An imperfect signal cancellation using negative feedback improved 1.3dB and 8.2dB at 2.5MHz and 5MHz offset of IMSR compared to an imperfect signal cancellation.

### I. 서론

3세대 IMT-2000 시스템은 넓은 대역폭의 WCDMA 신호를 사용하게되고 그래서 기지국에서 쓰이는 전력 증폭기 또한 광대역성을 요구하고 있다. 전력 증폭기는 최대효율을 얻기 위해 포화영역근처에서 동작되고, 증폭기의 비선형성에 의해 발생하는 IMD들은 인접채널에 영향을 주게 된다. 이런 비선형성을 개선하기 위한 Feedback, Predistortion, Feedforward등과 같은 선형화 방법들이 있고, 그 중 Feedforward 방식은 선형 개선량 및 대역폭이 가장 크다.[1],[2]

Feedforward 방식은 크게 원 신호를 제거하기 위한 Signal 상쇄 루프와 Error 신호를 제거하기 위한 Error 상쇄 루프로 나뉜다. 본 논문에서는 Signal 상쇄루프에서 Imperfect Signal Cancellation을 시킴으로써 Error 증폭기에 의한 부가적인 Error를 최소화했다. 또한 주 증폭기의 출력에서 Error Signal을 Feedback함으로써 전체출력 신호의 선형성을 증가시키는 선형전력증폭기 시스템을 설계하였고 시스템 레벨에서 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 Agilent사의 ADS를 이용하여 시뮬레이션 하였다.[3],[4]

## II. 선형 전력 증폭기의 시스템 설계

Feedforward 방식은 그림 1에서와 같이 크게 Signal 상쇄부와 Error 상쇄부로 나눌 수 있다. 각 상쇄부는 서로 독립적으로 분리하여 크기와 위상 및 Delay를 맞추어 주어야 하고 크기와 위상을 제어하기 위해서 벡터 모듈레이터를 이용하였다.

첫째 루프에서 벡터 모듈레이터는 증폭기에 의한 Error를 포함한 신호와 원신호 사이의 상관관계를 이용하여 컨트롤하고 상관관계가 없을 때 Signal은 Perfect Cancellation된다. 두 번째 루프에서는 인접 채널에 나타나는 Error의 파워를 최소화하는 것으로 벡터 모듈레이터를 컨트롤하였다.[1],[2],[6]

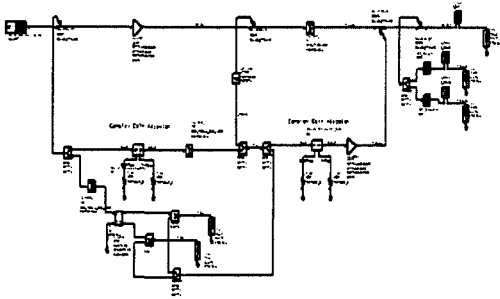


그림 1. Feedforward 증폭기의 회로도

본 논문에서 사용된 주 증폭기는  $P_{1dB}$ 가 40dBm, Gain이 38dB,  $IP3$ 가 65dBm인 것으로 설정하였고, Error 증폭기는  $P_{1dB}$ 가 30dBm Gain이 58dB,  $IP3$ 가 55dBm인 증폭기로 설정하고 시뮬레이션 하였다.[7]

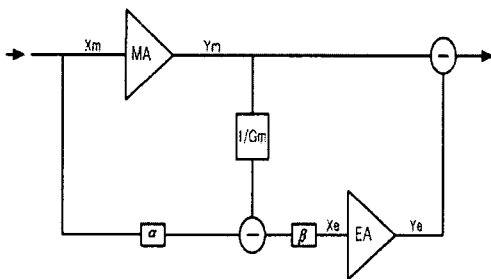


그림 2. Feedforward 블록도

그림 2는 아래수식전개를 위해 Feedforward를 간략화 시킨 블록도 이다. Imperfect Signal Cancellation이 Feedforward출력에 어떠한 영향을 미치는지를 수식적으로 간단히 정리해보면,

$$Y_m = G_{1m}X_m + G_{3m}X_m^3 \quad (1)$$

$$X_m = e(t)\cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

$$Y_e = G_{1e}X_e + G_{3e}X_e^3 \quad (3)$$

(2)식은 Envelop Modulated 입력신호이고, (2)식을 (1)식에 대입 후 Error 증폭기로 입력되는 신호를 대역제한 후 표현하여보면

$$X_e = \beta \left\{ (a+1)e(t) + \frac{3}{4} \frac{G_{3m}}{G_{1m}} e(t)^3 \right\} \cos(\omega_0 t) \quad (4)$$

여기서,  $a$ 는 Signal 상쇄레벨을 결정하기 위한 Amplitude Control 계수이고,  $\beta$ 는 Error 상쇄레벨을 결정하기 위한 Amplitude Control 계수이다. 이 에러 신호가 Error증폭기를 통과한 후 Envelope Signal 출력 크기를 표현하면 아래와 같다.

$$Y_e | e(t) = G_{1e}(a+1)e(t)$$

$$Y_e | e(t)^3 = \frac{3}{4} \left\{ G_{1e} \frac{G_{3m}}{G_{1m}} + G_{3e}(a+1) \right\} e(t)^3$$

$$Y_e | e(t)^5 = \frac{27}{16} G_{3e} \frac{G_{3m}}{G_{1m}} (a+1)^2 e^5$$

$$Y_e | e(t)^7 = \frac{81}{64} G_{3e} \left( \frac{G_{3m}}{G_{1m}} \right)^2 (a+1) e(t)^7 \quad (5)$$

위 식에서 보듯이 에러증폭기의 비 선형성과 입력 신호의 높은 PAR(Peak-To-Average Ratio)로 인한 추가적인 Error의 크기는 Signal Cancellation 컨트롤 계수( $a$ )에 따라 달라질 수 있음을 알 수 있다. 즉 Error 증폭기에 의한 추가적인 Error는 Signal Cancellation 계수를 최적화 시킴으로써 줄일 수 있고 최종 출력에서 Error 증폭에 의한 Error를 최소화 함으로써 선형성을 증가시킨다. [3],[5]

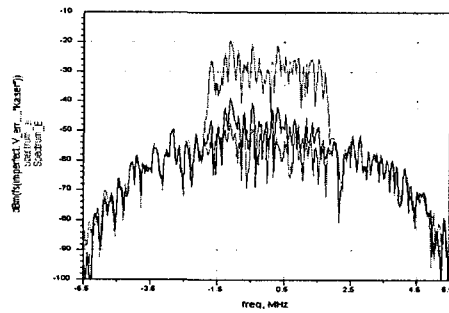


그림 3. Imperfect Signal Cancellation과 Perfect Signal Cancellation

Perfect Signal Cancellation을 위해 첫 번째 루프에서 Correlation관계를 이용해 구한 벡터 모듈레이터의 계수 값은  $a_i = -0.507$   $a_q = 2.631$ 이고, 두 번째 루프에서 컨트롤 방법은 인접채널의 누설파워가 최소가 되도록 벡터 모듈레이터 계수( $\beta$ )를 컨트롤하였다. 그리고 두 번째 루프의 컨트롤 방법을 이용해 첫

번째 루프의 벡터 모듈레이터(a)를 컨트롤함으로써 Imperfect Signal Cancellation을 만들었고 다시 두 번째 루프의 벡터 모듈레이터의 계수(β)를 최적화 하였다. 이 때의 계수값은 ai=-0.394, aq=2.449, βi=1.08, βq=2.432였고, Signal 상쇄레벨은 Perfect cancellation보다 19dB 적은 20.8dB였다.

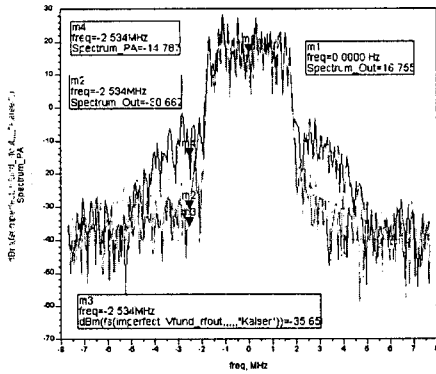


그림 4. Imperfect And Perfect Signal Cancellation의 최종 출력

시뮬레이션에 이용된 WCDMA는 총 전력은 0dBm, Bit-rate는 3.84MHz, PAR은 5.8dB, 중심주파수 2.15GHz이며 시뮬레이션 결과 2.5MHz offset에서 IMSR이 5dB 증가해서 -52.4 dBc를 5MHz offset에서는 7dB 증가해서 -53.5 dBc의 결과를 얻었다. ACPR 테스트는 2.5MHz offset의 경우 -49dBc로 약 3dB 증가하였다. 그림5는 시뮬레이션 결과 그래프이다.

다음으로 Feedback을 이용할 때의 동작원리를 쉽게 이해하기 위해서 Two-tone 입력으로 설명하면,

$$V_{in} = A \cos \omega_1 t + A \cos \omega_2 t$$

$$V_{out} = k_1 V_{in}(t) + k_2 V_{in}(t)^2 + k_3 V_{in}(t)^3 + \dots$$

위 출력식에서 IMD<sub>3</sub> 성분만을 다시 표현해보면,

$$V_{out_3} = \frac{3}{4} k_3 A^3 \{ \cos(2\omega_1 - \omega_2)t \} \quad (6)$$

다시 입력에 삼차 IMD성분이 Feedback된 경우에 입력과 출력을 표현해보면,

$$V_{in_{feed}} = A \cos \omega_1 t + A \cos \omega_2 t + B \cos[(2\omega_1 - \omega_2)t + \theta]$$

Feedback에 의한 IMD<sub>3</sub>성분을  $B \ll 1$  조건으로 간략화 시키면,

$$V_{out_{feed3}} = \left( k_1 B + \frac{9}{2} k_3 A^2 B \right) \cos[(2\omega_1 - \omega_2)t + \theta] \quad (7)$$

이고, 식 (6)과 (7) 이 크기가 같고  $\theta = 180$  이면 서

로 상쇄될 수 있다. [1],[3]

Feedback Loop에서의 벡터 모듈레이터의 컨트롤 계수(γ)는 그림5에서와 같이 증폭기에서 발생한 인접채널의 Error들이 최소화되도록 최적화 하였다.

Signal Cancellation과 Error Cancellation을 위한 벡터 모듈레이터의 계수(α, β)는 달라진 Error레벨에 맞추어 인접채널의 파워 최소화로 최적화 시켰다. 다시 말해 모든 벡터 모듈레이터의 계수 값들은 최종출력에서 인접채널의 파워가 최소가 되게 컨트롤한다.

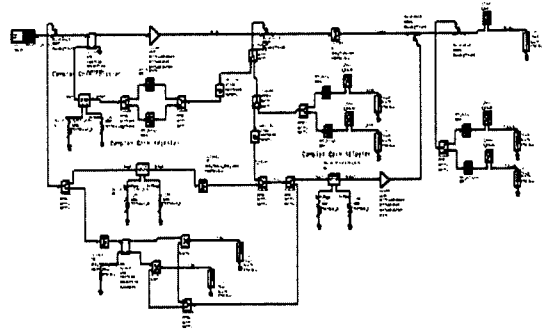


그림 5. Imperfect Signal Cancellation과 Feedback을 이용한 회로도

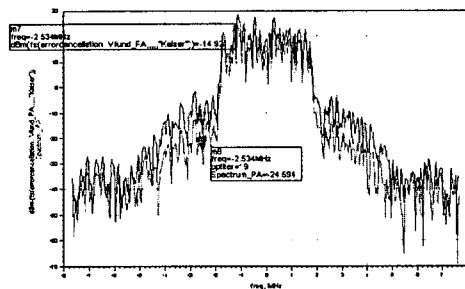


그림 6. 증폭기에 Negative Feedback후의 출력 결과

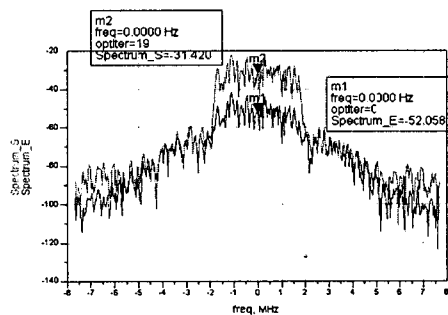


그림 7. Feedback에 Feedforward 시스템 추가 시 Signal Imperfect Cancellation

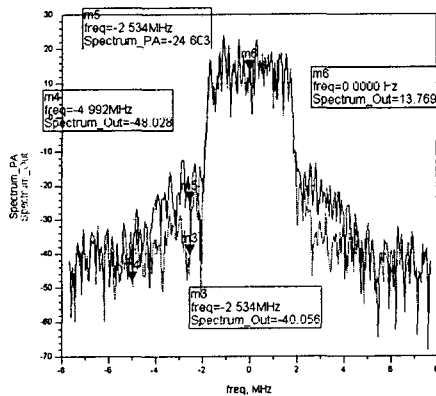


그림 8. Feedback-Feedforward를 이용한 선형전력증폭기의 최종출력

그림[5]-[8]은 Negative Feedback과 Signal Imperfect Cancellation을 이용하는 Feedforward 시스템의 회로도 및 출력 결과이다.

Negative Feedback만을 가했을 때 선형화정도는 2.5MHz offset에서 IMSR이 -24dBc로 10dB 향상되었고, Imperfect Signal Cancellation을 하는 Feedforward 시스템에 부가적으로 Negative Feedback Loop를 추가하였을 때 21dB Signal Cancellation이 이루어져 Imperfect Signal Cancellation이 되었다. 결과로 2.5MHz offset에서 -53.7dBc, 5MHz offset에서 -61.7dBc의 IMSR특성이 나왔고, Imperfect Signal Cancellation보다 각각 1.3dB, 8.2dB 증가하였다.

이때의 출력 파워는 32.14dBm으로 Feedback을 추가함으로써 전체 이득이 2dB정도 줄었음을 확인하였다.

### III. 결론

WCDMA 1-Carrier 입력시 Imperfect Signal Cancellation을 이용할 때 출력파워는 34.8dBm이고 2.5MHz offset에서 -52.4dBc, 5MHz offset에서 -53.5dBc의 IMSR특성을 나타내며, Perfect Signal Cancellation과 비교해서 5dB, 7dB 각각 향상되었다.

인접채널의 파워가 최소가 되도록 벡터 모듈레이터의 계수( $\alpha$ ,  $\beta$ )들을 최적화 시킨 결과 Imperfect Signal Cancellation이 됨을 확인하였다.

Imperfect Signal Cancellation과 Feedback을 같

이 사용하는 경우에 전체 신호의 이득은 줄어들었지만, Imperfect Signal Cancellation만을 했을 때와 비교해서 2.5MHz와 5MHz offset에서 1.3dB, 8.2dB씩 IMSR이 향상되었다.

### 참고 문헌

[1] Nick Potheary, "Feedforward Linear Power Amplifier", Artech House, 1998.

[2] Peter B. Kenington, "High-Linearity RF Amplifiers Design", Artech House, 2000.

[3] Young Yun Woo, Youngoo Yang, Jaehyok Yi, Joongjin Nam, Jeonghyeon Cha and Bumman Kim " An Adaptive Feedforward Amplifier for WCDMA Base Stations", *Microwave Journal Feature*, April. 2003.

[4] 김경태, 김영훈, 양승인, "새로운 형태의 IMD<sub>3</sub> Feedback-Feedforward 선형 전력 증폭기에 관한 연구", *춘계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집*, pp. 93-96, 2000.

[5] James K. Cavers, "Adaptation Behavior of a Feedforward Amplifier linearizer", *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, Vol.44.NO. 1, Feb, 1995.

[6] Shawn P. Stapleton, "Adaptive Feedforward Linearization for Power Amplifiers", *ADS seminar*, Nov, 2000

[7] Cteve C. Cripps, "RF Power Amplifiers for Wireless Communications", Artech House, 1999